

超音波ガイド下超音波治療用アレイ型トランスデューサの研究

著者	東 隆
号	55
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工第2216号
URL	http://hdl.handle.net/10097/61688

氏 名 あずま たかし
授 与 学 位 名 東 隆
学 位 授 与 年 月 日 博士 (工学)
学位授与の根拠法規 平成22年9月8日
学位規則第4条第2項

学 位 論 文 題 目 超音波ガイド下超音波治療用アレイ型トランスデューサの研究
論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 梅村晋一郎 東北大学教授 櫛引 淳一
東北大学教授 金井 浩

論 文 内 容 要 旨

集束超音波治療は、体外から患部に集束した超音波により、正常組織を温存しながら患部を壊死させる低侵襲治療である。患部を肉眼視しないので、イメージガイドが必須である。超音波ガイド下超音波治療には、1つのトランスデューサ開口を撮像と治療に共用する利点大きい。また、治療と撮像それぞれに適した周波数帯域を用いて、治療用の高出力と撮像における高画質を両立する必要があるが、従来、撮像用トランスデューサから治療用高出力を得るのは困難であった。著者は、この高出力限界を決めるものが温度上昇であること、構成材料等の変更によりこれを1桁以上抑制できることを実験と理論により明らかにした。さらに、これを3桁近く抑制できる新規構造を提案、そのトランスデューサを試作して実用性を確認した。本論文は、これらの研究成果をまとめたもので、全4章よりなる。

第1章は、序論である。まず先行する研究開発を述べている。次に、撮像・治療トランスデューサの開口に関して論じ、撮像と治療それぞれに用いる開口径を最大化するためや、治療ビームの伝播経路全域を撮像視野に収めるためには、撮像・治療に開口を共用するトランスデューサがきわめて有利であることを述べている。次に、治療と撮像それぞれに適した周波数を論じ、患部以外の組織への不可逆的影響を最小に抑えつつ、患部での治療効果を最大にするには、焦点利得が最大となる周波数が適しており、この周波数は高画質な撮像に適した周波数の約4分の1であることを述べている。

これら開口径と周波数の検討の結果から、撮像と治療に開口を共用する2周波トランスデューサの開発を本論文の目的とした。

第2章では、撮像用構造広帯域アレイ型トランスデューサの高出力化を目的として、高出力化を妨げる素子破壊の機構を実験と理論により検討した。さらに構成材料の変更により素子破壊を防いだ場合に関して、その高出力化の限界を検討した。

まず、高出力化を図った時の素子破壊の原因を調べるため、破壊過程における電氣的インピーダンスと水中パルス特性の変化を、実験と計算により調べた。図1に結果を示す。計算では、整合層と振動子間の接着層の一部を空気に置換えた接着層剥離モデルを構築した。接着層を空気に置換する面積比を変えることで、破壊の程度が異なる試料を模擬した(図の上段)。実験では、破壊を起こし得る高出力送波と素子特性評価を繰返し、高出力送波のバースト波のサイクル数を変えることで破壊の程度が異なる素子を再現した(図の下段)。

計算と実験の結果は良く一致した。またいずれの測定においても、破壊の進行に伴い、複数の共振ピークが一つのピークに収斂している。これは、整合層と振動子間の接着層が剥離して、整合層と振動子の複合共振が弱まり、振動子単体の振動が支配的になっていることを示している。この結果から、接着層の剥離が素子破壊の原因であると推定出来る。冷却に伴って、素子破壊が引き起こされる送波出力が大きくなったので、接着層剥離の原因は温度上昇にあると考えられる。温度上昇による接着剤強度の低下や、熱応力による接着層の剥離が素子破壊の原因と考えられる。

素子破壊の原因となる温度上昇に対し

ては、発生した熱を素子外に効率的に放出する対策と、熱源となる超音波吸収を減らす対策が考えられる。後者は本章に譲るとして、本章では前者を検討した。具体的には、バックング材をフェライトゴムから炭素繊維入りのゴムに取り換えることで、熱伝導率を16倍として、トランスデューサ内の熱抵抗を低減し、加えて、バックング材裏面で水冷を行うことで温度上昇を抑制する。

温度上昇の計算の結果、撮像周波数での高出力送波では、従来比40倍の高出力化が可能となった。また中心周波数2MHzの撮像用素子から、0.5MHzの血栓溶解治療用の送波を行った時の素子内温度の計算結果を図2に示す。図下に示す従来構造では、高減衰バックング材中の発熱により、治療中の温度上昇が75℃となり、素子破壊に至るのに対し、熱抵抗低減により、温度上昇は4℃程度に抑制され、素子破壊を防ぐことができることが明らかとなった。一方、加熱凝固治療条件では、温度上昇が血栓溶解条件の約1000倍となるので、本対策だけでは不十分であることも明らかとなった。

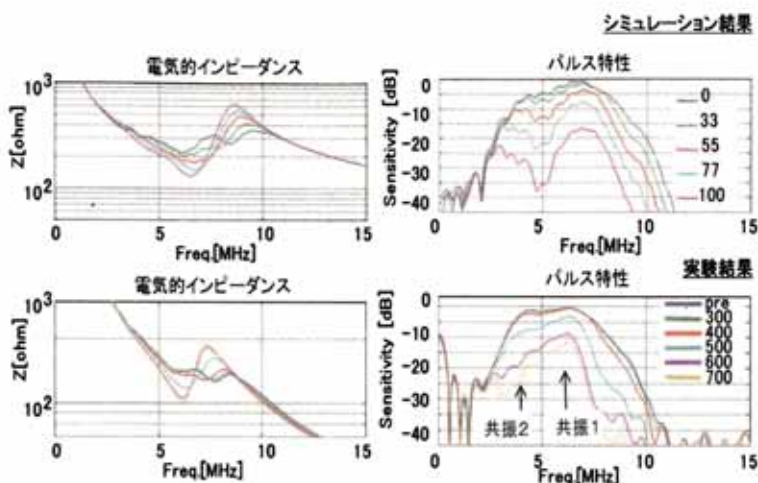


図1：素子破壊過程のインピーダンス（左）とパルス特性（右）に関する計算（上）と実験（下）の結果。色の異なるプロットは、接着層中の剥離部の面積比（計算）と、バースト波のサイクル数（実験）を示す。

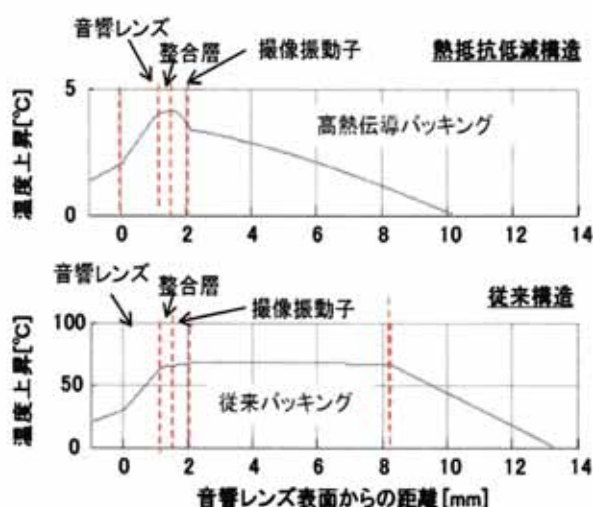


図2：血栓溶解治療時の温度上昇の計算結果。音響インテンシティ：0.7W/cm²、照射時間：10分

第3章では、新規提案の周波数選択性音響絶縁層を挟む2周波積層型アレイ・トランスデューサの設計・試作・評価について述べる。

熱源となる超音波吸収を減らすために、治療用超音波発生専用の振動子を用いる。これに、撮像振動子を直に積層すると、互いの結合振動のため振動の制御が困難となるので、図3（a）に示す周波数選択性の音響絶縁層を挟む構造を考案した。音響絶縁層は、撮像周波数の超音波は前面に反射し、治療周波数の超音波は前面に透過させるように機能する。

音響絶縁層の設計方法を説明する。設計で制御するのは、撮像における反射率と治療における透過率である。通常、

撮像のダイナミックレンジは 60dB 以上であり、撮像パルスの反射がアーチファクトの原因となることを防ぐためには、尾引きをこのレベルに対して十分に抑制する必要がある。一方、治療では送波のみであり受波は必要ないので、透過率の低下は、破壊さえ防ぐことができれば、印加電圧の増大で補うことが出来る。つまり、撮像における反射の制御は、治療における透過の制御より重要である。このことを踏まえ、以下の 3 つの手順で設計を行った。

- (1) 1 次元連続波モデルにより、撮像と治療を両立する条件を広範囲に探索。
- (2) 1 次元パルスモデルにより、撮像パルスの尾引きが抑制される条件を探索。
- (3) 2 次元パルスの計算により、1 次元モデルでは考慮されないアレイ方向へのモードの影響を検討。

この手順により、最適な音響絶縁層は、厚みが波長の 0.05～0.2 倍、音響インピーダンスが PZT の音響インピーダンスの 0.05～0.2 倍であるという結論に達した。以上により、音響絶縁層を挟む 2 周波積層構造の設計方法を確立できた。

次に、加熱凝固治療の送波条件における温度上昇を計算し、提案構造の有効性を検証した。結果を図 4 に示す。この結果、提案構造によれば、従来構造の 1/800 に温度上昇を低減することが出来るので、血栓溶解や加熱凝固を可能とする共用開口 2 周波トランスデューサが実現可能となることが明らかとなった。

撮像における高画質と治療用の高出力を両立できる見通しが得られたので、提案構造の超音波ガイド下血栓溶解用トランスデューサを試作した。断面の顕微鏡写真を図 3 (b) に示す。試作素子の撮像における送受波感度とビーム特性、治療における送波感度とビーム特性を評価した結果、いずれの観点においても十分に実用的な特性を備えていることを確認できた。

第 4 章は、考察と結論である。

以上の通り、本論文は、超音波ガイド下超音波治療のキーデバイスとなる撮像・治療共用開口 2 周波トランスデューサを実現する技術を確認した研究をまとめたものである。撮像用トランスデューサの高出力限界を決めるものが温度上昇であること、構成材料等の変更によりこれを 1 桁以上抑制できること、新規提案の 2 周波積層構造によれば 3 桁近く抑制できることを明らかにし、さらに、提案構造のトランスデューサを試作して実用性を確認した。

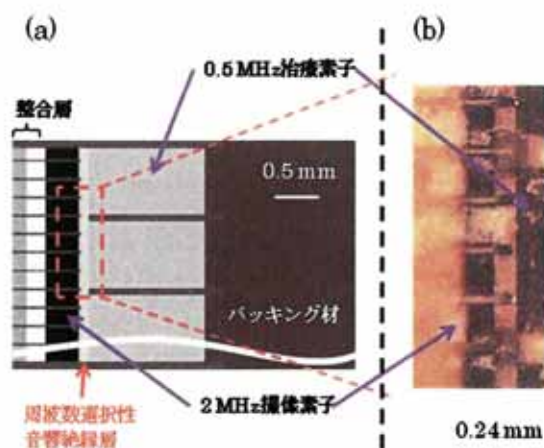


図 3： 周波数選択性音響絶縁層を用いた同一口径 2 周波トランスデューサ。説明図 (a) と断面の顕微鏡写真 (b)

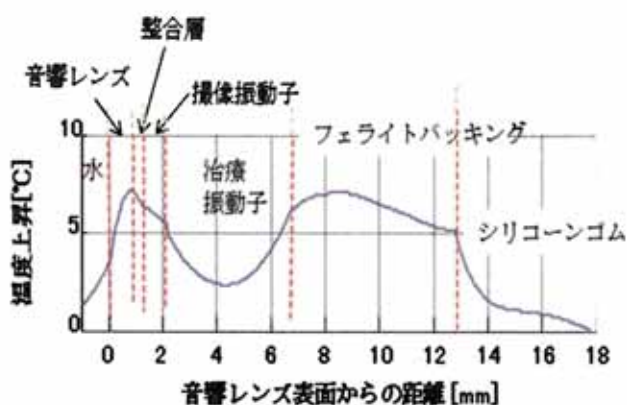


図 4： 加熱凝固治療における温度上昇の計算
音響インテンシティ：1 kW/cm²，照射時間：10 s

論文審査結果の要旨

集束超音波治療は、体外から患部に集束した超音波により、正常組織を温存しながら患部を壊死させる低侵襲治療である。患部を肉眼視することが出来ない治療法であるため、イメージガイドが必須となる。超音波ガイド下超音波治療では、1つのトランスデューサ開口を撮像と治療に共用する利点大きい。また、治療と撮像それぞれに適した周波数帯域を用いて、治療用の高出力と撮像における高画質を両立させる必要があるが、従来、撮像用トランスデューサから治療用高出力を発生させるのは困難であった。著者は、この高出力限界を決める要因が温度上昇であること、構成材料等の変更によりこれを1桁以上抑制できることを実験と理論により明らかにした。さらに、これを3桁近く抑制できる新規構造を提案し、そのトランスデューサを試作して実用性を確認した。本論文は、これらの研究成果をまとめたもので、全編4章よりなる。

第1章は序論であり、先行する研究開発を概観し、治療と撮像それぞれに適した周波数を検討して撮像・治療開口共用2周波トランスデューサの必要性を論じている。

第2章では、撮像用構造広帯域アレイ型トランスデューサの高出力化について述べている。まず、高出力化を妨げる素子破壊の機構を実験と理論により検討し、温度上昇による接着層剥離が原因であることを見出している。また、構成要素の熱抵抗低減により、血栓溶解を可能とする従来比40倍の高出力化が実現できることを明らかにした。これは、工業的に確立された従来構造について、高出力化への解決策を示すとともに、その限界を明らかにした点で工学的に重要な研究成果である。

第3章では、新規に提案した周波数選択性音響絶縁層を挟む2周波積層型アレイ・トランスデューサの設計・試作・評価について述べている。数値計算による設計方法を確立し、構成要素の温度上昇を従来構造の1/800に低減することにより、血栓溶解や加熱凝固を可能とする開口共用2周波トランスデューサを実現できることを明らかにした。また、提案構造の超音波ガイド下血栓溶解用アレイ・トランスデューサを試作・性能評価し、提案構造の実用性を確認している。撮像における高画質と治療における高出力の両立を可能としたことは、工学的に意義が大きく、その手法は学術的にも高く評価される。

第4章は考察と結論である。

以上要するに本論文は、超音波ガイド下超音波治療のキーデバイスとなる撮像・治療開口共用2周波トランスデューサについて、それを実現する新たな方法を考案・実証したものであり、医用超音波工学ならびに電気・通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。